EVALUACIÓN DE UN ACELERÓMETRO INTEGRADO PARA UNA APLICACIÓN MÉDICA

J. E. Suen, J. Folgueras.

Departamento Equipos Médicos 1, Instituto Central de Investigación Digital,
Calle 202 No. 1704 e/ 17 y 19, siboney, Playa, La Habana, Cuba
jesuen@icid.cu

RESUMEN

Los estimuladores de nervios periféricos auxilian a los anestesiólogos a evaluar el grado de bloqueo neuromuscular de un paciente. Si se mide la respuesta muscular a una estimulación adecuada es posible cuantificar la profundidad del relajamiento muscular durante la anestesia profunda. Un método para ello consiste en determinar la aceleración del dedo pulgar cuando se estimula el nervio mediano con patrones de estímulos conocidos y medir la magnitud de la aceleración del dedo debida a la contracción del adductor del pulgar bajo la acción del estímulo. Se presenta el sistema empleado para recoger y procesar los datos acerca de la aceleración y se discuten los resultados obtenidos de la evaluación de un nuevo acelerómetro para la medición de la aceleración del dedo pulgar.

Palabras clave: *Acelerómetro, anestesia profunda, bloqueo neuromuscular, relajamiento muscular.*

1. INTRODUCCIÓN

Años atrás, los anestesiólogos lograban la relajación muscular a partir de la inducción de la anestesia profunda con la inhalación de medicamentos, cuya utilización venía acompañada de efectos colaterales severos. Esta situación cambió cuando aparecieron los modernos agentes de bloqueo neuromuscular.

En la actualidad el relajamiento se obtiene con el empleo de un solo medicamento denominado relajante muscular, que actúa principalmente sobre la placa motora de los músculos estriados.

Los estimuladores de nervios periféricos [1] auxilian a los anestesiólogos a monitorear la función neuromuscular y conocer el grado de bloqueo durante un proceso quirúrgico. Se emplean también para determinar la necesidad de reversión del bloqueo durante el proceso de recuperación y decidir cuándo administrar un agente de reversión y cuándo existen realmente las condiciones para la intubación.

Anteriormente, los autores participaron en el diseño de un estimulador-monitor para determinar el grado de relajamiento neuromuscular del paciente que se encuentra en un proceso operatorio bajo los efectos de anestesia profunda. [2,3] Con el mencionado estimulador se utilizaba el transductor (acelerómetro) ADXL05 de la firma Analog Devices, que permitía la medición de la aceleración, el procesamiento y el acondicionamiento de la señal en un único chip de silicio, con un bajo consumo de energía y una alta integración.

En la actualidad este acelerómetro es obsoleto y fue necesario seleccionar y ensayar un nuevo acelerómetro que pudiera sustituir la función del antes mencionado. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de un acelerómetro empleado en la medición de la aceleración del dedo pulgar, aunque puede ser aplicado a otras ramas de la Medicina.

2. METODOLOGÍA

Requerimientos del acelerómetro

El acelerómetro adecuado para la medición de la aceleración del dedo pulgar debía cumplir con los siguientes requisitos fundamentales:

- Gama de medición de ± 5 **g** a ± 1 **g** (donde **g** = 9,8 m/s^2 que es la aceleración de la gravedad al nivel del mar).
- Resistencia a golpes y caídas mayor de los 10000 **g**.
- Suficientemente pequeño para su adaptación al dedo pulgar.

Datos del acelerómetro seleccionado

Fue seleccionado el acelerómetro MMA1250D de la firma Motorola, compatible con los requisitos de diseño en cuanto a dimensiones, peso y protección contra golpes o caídas [4]. En la tabla I se muestran los datos más importantes de este acelerómetro:

ISBN 959-212-158-3, Copyright 2005, Sociedad Cubana de Bioingeniería, artículo T005

Tabla I
Datos del acelerómetro MMA1250D

Circuito Integrado de 16 pines Alimentación: 4,75 V a 5, 25 V CD Rango de aceleración: ± 1 **g** y ± 5 **g** Resistencia a golpes o caídas: > 10000 **g** Dimensiones: Longitud: 10,45 mm Anchura: 7,60 mm

Sistema de Adquisición y Digitalización de Datos

Para evaluar el grado de relajamiento muscular de un paciente sometido a anestesia profunda, los anestesiólogos emplean cinco tipos de estímulos eléctricos. Estos estímulos han sido evaluados en la literatura respecto a la respuesta que producen, correlacionándose la respuesta motriz del dedo pulgar con la profundidad de relajamiento muscular.

Los cinco estímulos empleados se refieren a continuación, sin entrar en los detalles de los mismos:

- Contracción Simple o *Single Twitch* (ST)
- Tren de Cuatro o *Train of Four* (TOF)
- Tetánico o *Tetanus*
- Doble ráfaga o *Double Burst* (DB)
- Conteo Postetánico o *Post Tetanic Count* (PTC)

La medición de la respuesta del dedo pulgar se basa, en este caso, en la determinación de la aceleración del dedo pulgar que caracteriza su desplazamiento ante los diferentes patrones de estímulos eléctricos.

Para evaluar el comportamiento del nuevo acelerómetro los autores utilizaron el estímulo conocido como contracción simple o "*single twitch*". El estímulo es el más simple de los cinco mencionados y es posible aplicarlo a un sujeto sin anestesiar, empleando valores razonables de la intensidad de corriente, ya que los demás no brindan información adicional acerca del funcionamiento del acelerómetro, aunque sí acerca de la profundidad de relajación muscular del paciente, que no se evalúa en este trabajo.

Para la medición de la aceleración fue diseñado y construido un sistema para la adquisición y digitalización de datos, encargado de recoger la señal, digitalizarla y luego mostrar los resultados por medio de un programa, a través de dos displays numéricos.

El sistema diseñado consta de los bloques siguientes:

Bloque de Digitalización de los Datos

- Acelerómetro MMA1250D
- Conversor A/D ADC0831
- Microcontrolador PIC16C57
- Display de dos dígitos con LED's de 7 segmentos

Bloque de Sincronización de la Recogida de Datos

- Oscilador de baja frecuencia
- Fuente de corriente constante
- Electrodos de estimulación

La figura 1 muestra el diagrama en bloques de este sistema.

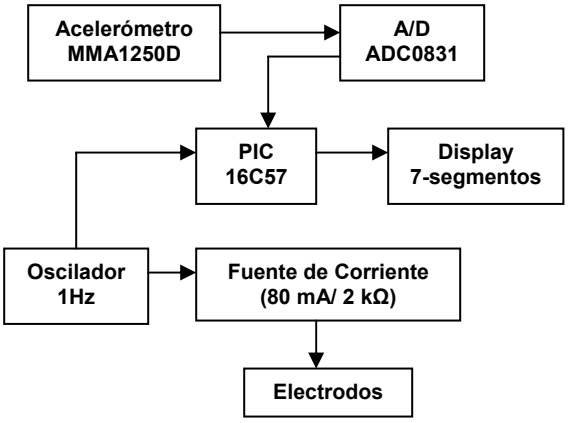

Figura. 1: Diagrama en bloques del sistema de adquisición y digitalización de datos

El *firmware*, grabado en el microcontrolador PIC16C57, se encarga de activar el circuito de estimulación, recoger los valores de tensión proporcionales a la aceleración, establecer la equivalencia en valores de aceleración y mostrarla por medio del display numérico. Mediante el display se muestran también los valores de la intensidad de la corriente de estimulación, que se cambian a voluntad del operador.

Posición del acelerómetro y electrodos en la mano del paciente

La figura 2 muestra la posición de los electrodos y el acelerómetro para la medición. Por medio de un cable de paciente se establece la conexión entre los electrodos de estimulación y el acelerómetro con el sistema de adquisición y digitalización de datos.

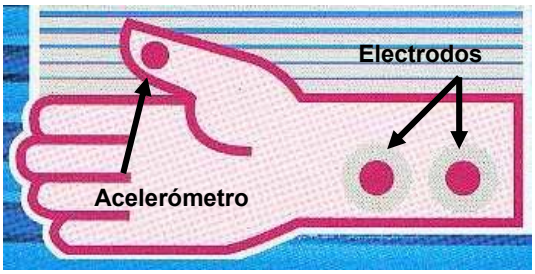

Fig. 2: Posición del acelerómetro y los electrodos de estimulación, en la mano del paciente.

Se conoce que existe una demora de algunos milisegundos, aproximadamente 2 ms para un sujeto normal, entre la estimulación del nervio mediano y el arribo del potencial de acción generado por el estímulo a la placa neuromuscular. Este potencial de acción es el causante del movimiento del dedo pulgar como respuesta al estímulo externo [1]. La señal de tensión se trasmite al sistema para la adquisición y digitalización de datos y el programa se encarga de encontrar su equivalencia en valores de aceleración.

También es conocida la forma característica que adoptan los valores de aceleración medidos para una

corriente de estimulación cuando se grafican los resultados de la aceleración contra el tiempo transcurrido desde que se inicia el movimiento del pulgar [1].

2. RESULTADOS

Medición de la aceleración

Para las mediciones de la aceleración del dedo pulgar se emplearon 5 voluntarios aparentemente sanos con su consentimiento informado, no relajados (sin los efectos de relajante muscular alguno) y se tomaron medidas con el objetivo de someter a todos los sujetos a iguales condiciones de medición. El experimento consistió en:

a. Estimular el nervio mediano empleando el estímulo conocido como contracción simple con un pulso con frecuencia de 1Hz y anchura de 300 µs.
b. El estímulo es suministrado por la fuente de corriente constante [5].
c. Transcurridos 2 ms se comienza la adquisición de los datos de aceleración. Se recogen para cada respuesta al estímulo diez valores de aceleración, medidos cada 10 ms.
d. Se empleó una gama de valores de aceleración hasta 1000 m**g,** siguiendo la experiencia previa en los valores esperados [1].

Comprobación de la repetibilidad de la medición

A un voluntario se le aplicó un estímulo con intensidad de corriente de 8 mA y se recogieron los valores de la aceleración. La estimulación se aplicó tres veces a intervalos de 10 minutos entre una estimulación y la siguiente. De cada estimulación se obtuvieron 10 valores de la aceleración, que se representan en la figura 3. El procedimiento se repitió para otros dos valores de la intensidad de corriente del estímulo, empleando 10 y 12 mA respectivamente. Para cada intensidad de corriente se determinó la respuesta promedio resultante de las tres curvas.

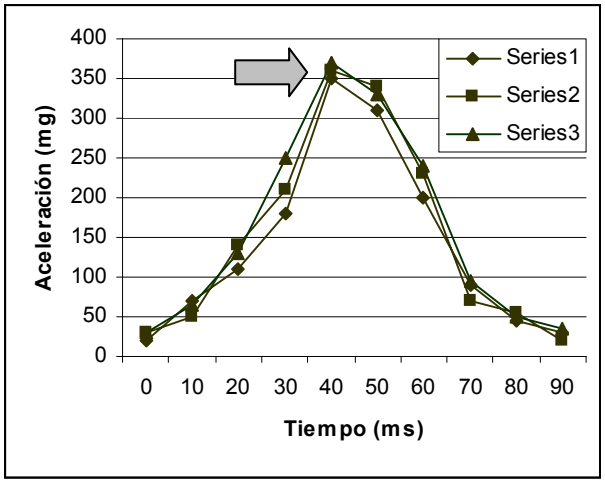

Fig. 3: Valores de aceleración para una intensidad de corriente de 8 mA aplicada a un mismo sujeto

Como se observa en la figura 3, los puntos experimentales presentan una cierta variabilidad entre un grupo de mediciones y otra. Es razonable pensar que esa variabilidad es consecuencia de errores aleatorios que afectan la medición de la aceleración para un tiempo establecido. Para comprobar esta suposición se aplicó una regresión polinomial al promedio de esas mediciones, empleando el sistema Statgraphics, versión 5.1.

Determinación de la aceleración para iguales corrientes en diferentes voluntarios

A cada uno de tres sujetos sometidos al experimento se le aplicaron estímulos con tres valores de intensidad de corriente (8 mA, 10 mA y 12 mA), recogiendo la dependencia de la aceleración con el tiempo para cada valor del estimulo.

En la figura 4 se muestran los valores de los resultados de los tres sujetos a los cuales se les aplicó una intensidad de corriente de estimulación de 8 mA

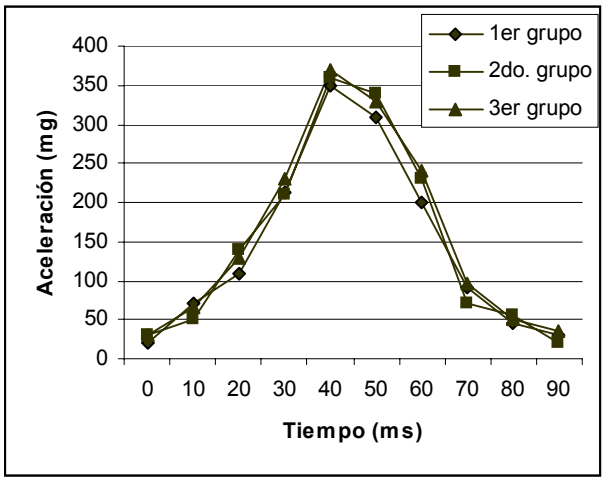

Fig. 4: Valores de aceleración para una corriente de 8 mA en los sujetos 1, 2 y 3.

Determinación de la aceleración para diferentes corrientes en un mismo sujeto

La figura 5 muestra los valores de aceleración empleando diferentes valores de corriente en un mismo sujeto

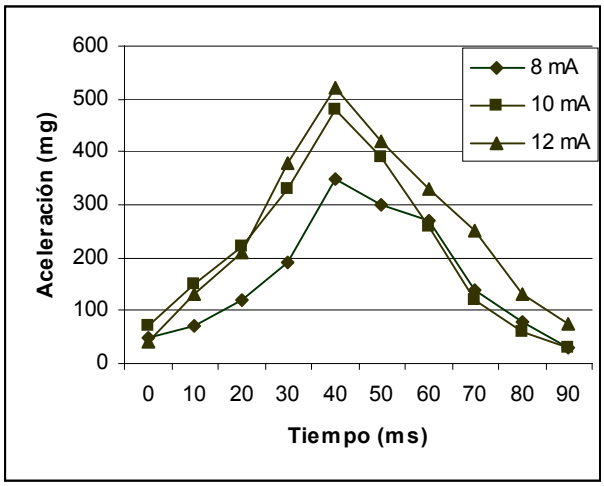

Fig. 5: Valores de aceleración para corriente de 8, 10 y 12 mA en un mismo sujeto

Un caso particular se observó en otro voluntario, donde las intensidades de corriente de estimulación aplicadas al resto de los sujetos (8 mA, 10 mA y 12 mA) no permitía detectar el movimiento del dedo pulgar para medir la aceleración y fue necesario emplear valores de estimulación mayores (13 mA, 15 mA y 21 mA). La figura 6 muestra los valores de aceleración promedio para 8 mA de los sujetos 1, 2 y 3 respecto a los valores obtenidos para 13 mA en el caso del sujeto atípico.

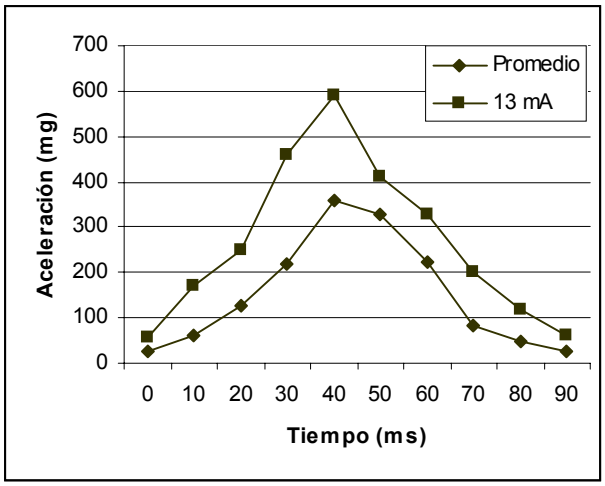

Fig. 6: Valores de aceleración promedio para una corriente de 8 mA en los sujetos 1, 2 y 3 y valores para 13 mA del sujeto atípico

4. DISCUSIÓN

Los resultados mostrados en la figura 3 demuestran que con el método empleado para la medición de la aceleración es posible lograr la repetibilidad de la medición, puesto que los valores experimentales obtenidos para cada valor de tiempo no difieren mucho entre una medición y otra. Desde el punto de vista del funcionamiento del monitor de relajamiento muscular, lo que interesa es el valor máximo de la aceleración. En este caso el valor máximo señalado por la flecha en la figura 3, demuestra que el error aleatorio no sobrepasa el 5 % respecto al valor promedio para esa medición.

La comprobación de la veracidad del modelo ajustado empleando la regresión polinomial de segundo orden, aplicada al promedio de esas mediciones, muestra que el modelo ajusta correctamente con la ecuación:

$$\mathbf{a = -10.14117t^2 + 12.5488t - 10.89}$$

donde a: aceleración y t: tiempo

El ajuste se fundamenta en que:

- Expresa más del 70% de la variabilidad total.
- El análisis de los residuos aporta linealidad con una probabilidad menor de 0,050.
- El valor probabilístico **p** es menor que 0,01, representando un 99% de confiabilidad de ajuste del modelo.

Analizando la figura 5, donde se presentan los valores de las mediciones realizadas a los sujetos que fueron estimulados con 8 mA de corriente, es posible apreciar que el comportamiento fue similar de un individuo a otro. Los valores de la aceleración aumentan cuando aumenta el valor de la corriente de estimulación aplicada. Las diferencias respecto a los valores particulares de aceleración para cada voluntario se deben a que los sujetos vinculados a los experimentos tienen diferentes niveles de sensibilidad y sus respuestas neuro-musculares a los estímulos no son iguales entre si. Las respuestas para 10 y 12 mA reflejan un comportamiento similar.

Respecto al caso mostrado en la figura 6, los autores consideran que esta situación se debe a que el sujeto 4 padece del Síndrome del Túnel del Carpo, con disminución de la sensibilidad a los estímulos. Sin embargo, su comportamiento en general, fue similar a los casos anteriormente analizados. No obstante, para tener seguridad de que todas las fibras musculares han sido reclutadas durante la estimulación, en la práctica se emplea una intensidad de 60 mA, denominada supramáxima.

Es evidente que al emplear un display de 2 dígitos para mostrar valores que son de tres dígitos se introduce un error que está dado por el valor menos significativo. En este caso, el mayor error que se introduce se da cuando el tercer valor sea 9. Sin embargo, el programa está concebido para que se aproxime al valor más cercano al entero, disminuyendo en gran medida las mediciones indirectas que se realizaron, con un error máximo del 5%.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados alcanzados en el trabajo con el acelerómetro, pueden formularse las siguientes conclusiones:

- Los resultados experimentales están en concordancia con los obtenidos con el empleo de otros acelerómetros, respecto a la forma de la curva y su comportamiento variable en dependencia del estímulo aplicado.
- El acelerómetro evaluado puede ser empleado para la medición de aceleración del dedo pulgar bajo la acción de diferentes intensidades de corrientes de estimulación.

REFERENCIAS

[1] L. Rodríguez: "Medición de la aceleración: una aplicación médica", Tesis de Maestría, junio 1998.
[2] L. Rodríguez, J. Folgueras, et al.: "A5705 Monitor de Relajamiento Muscular: Especificaciones del Producto", Instituto Central de Investigación Digital, La Habana, Marzo 2001.
[3] L. Rodríguez, J. Folgueras, et al.: "A5705 Monitor de Relajamiento Muscular: Manual del Usuario", Instituto Central de Investigación Digital, La Habana, Marzo 4001.
[4] Motorola Semiconductor Technical Data, "MMA250D, Low G Micro-machined Accelerometers", 2002.
[5] Díaz, M, J. Folgueras: "Fuente de impulsos a corriente constante para aplicaciones médicas", Ing. Electrónica, Autom. y Comunicaciones, Vol. XIX, 4, pp. 21-23, 1998.